

高熱伝導材料とレーザー材料の複合化による小型高機能 レーザーの創製

中央大学 理工学部電気電子情報通信工学科 庄司一郎

Development of Compact Sophisticated Lasers with Composite Structures of High Thermal-
Conductivity Materials and Laser Materials

Ichiro Shoji

Department of Electrical, Electronic, and Communication Engineering, Chuo University

新しい高機能レーザーデバイスとして、レーザー結晶 $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Nd:YAG) と、排熱材料としてダイヤモンド結晶とを一体化した複合構造レーザーを、常温接合技術を用いて初めて開発することに成功した。このデバイスは接合界面に無反射コート層を有しており、フレネル反射損失が最小化される。そのため、レーザー発振特性において、スロープ効率が以前作製した無反射コート層を有しない複合構造デバイスよりも高く、単体の Nd:YAG 結晶とほぼ同等となった。さらに、ダイヤモンドの高い排熱特性により、出力自体も無反射コート層を有しないデバイスの 1.2 倍、単体の Nd:YAG 結晶の 1.5 倍それぞれ向上した。

We have developed a new sophisticated laser device, a composite laser comprising a $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Nd:YAG) crystal and a diamond crystal, using the room-temperature-bonding technique for the first time. The device has an anti-reflection (AR)-coated layer at the bonded interface which minimizes the Fresnel-reflection loss. We have confirmed that the slope efficiency of the composite laser is higher than that of the directly bonded composite laser without the AR layer and nearly the same with that of a noncomposite Nd:YAG crystal. Moreover, the power from the composite laser with the AR layer is 1.2 and 1.5 times higher than from the composite laser without the AR layer and the noncomposite Nd:YAG crystal, respectively.

1. はじめに

固体レーザー材料における発熱の制御は、レーザーの低閾値・高効率・高出力・高ビーム品質化いずれにも不可欠な課題である。このうち、レーザー活性イオン添加材料を無添加材料と一体化させた複合構造は、添加材料で発生した熱を効率よく無添加材料に排熱できることから、熱制御の有効な手段として広く用いられている。

無添加材料としては通常、 $\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (Nd:YAG) に対しては YAG, Nd:YVO_4 に対しては YVO_4 (いずれも熱伝導率 10 W/mK 程度) というように、レーザー材料と同種の材料が用いられる。これは、複合構造の多くが拡散接合によって作製されているためである¹⁾。拡散接合は高温プロセスのため、熱膨張係数の異なる材料同士を高品質に接合するのは難しい。また、最近になって焼結法によって作製された複合構造セラミックスレーザーが報告されたが²⁾、異方性のある材料でこの手法を適用するのは現状では困難である。さらに、

一部のディスクレーザーでは、高い熱伝導率 (2000 W/mK) をもちヒートシンクとして理想的な材料であるダイヤモンドが使用されている³⁾。しかしながら、レーザー材料とはオプティカルコンタクトかキャピラリーボンディングにより単に圧着されているだけで、原子レベルの強固な接合は実現していない。

一方、本研究では常温接合を用いた複合構造レーザーの開発に取り組んでいる。常温接合は、真空中で材料表面にアルゴン原子ビームを照射し酸化膜・吸着原子を除去して表面原子を活性化させ、それらの表面同士を接触させると、常温のもとで原子レベルの強固な接合が実現する技術である⁴⁾。汎用性が高く異種材料同士の接合も可能であることから、これまで、線膨張係数がYAGの1/8程度しかないダイヤモンドとNd:YAGおよびNd:YVO₄との複合構造を作製し、レーザー発振に成功した⁵⁾。しかしながら、接合界面で材料の屈折率の違いによるフレネル反射が生じ、レーザー共振器内での損失となるため、効率率はレーザー結晶単体より低くなるという現状であった。

そこで本研究では、接合界面にコーティング層を導入した複合構造レーザーの作製を目的とした。すなわち、ダイヤモンドの表面にあらかじめレーザー光に対する無反射 (AR) コーティングを施しておき、それらコーティング層とレーザー結晶とを常温接合により接合する。この構造により、発振閾値やスロープ効率等、レーザー発振特性の向上を図り、従来の同種材料複合構造レーザーの出力を上回るレーザーを実現できる。

2. 常温接合による複合構造レーザーの作製

本研究では常温接合を用いてNd:YAG結晶とダイヤモンド結晶との複合構造レーザーを作製した。Nd:YAG結晶はNd濃度1 at.%でサイズが3 mm × 3 mm × 厚さ3 mm、ダイヤモンド結晶はElement Six社製で化学気相成長 (CVD) 法により育成され、サイズは3 mm × 3 mm × 厚さ1.5 mmであった。いずれの結晶も両端面は表面平坦性を $\lambda/10$ 以下、表面粗さ $R_a < 1$ nmで光学研磨してあるものを用いた。

Fig. 1に複合構造レーザーの作製プロセスを示す。(a)はプロセス全体を、(b)~(e)は各プロセスでの写真を示している。まず、真空チャンバ内で接合する材料同士を高真空中 ($\sim 10^{-5}$ Pa) で対向して配置し、それぞれの表面にアルゴン原子ビームを照射することにより、表面の酸化膜や吸着分子を取り除く(bおよびaの挿入図)。すると、材料表面に現れた原子はダングリングボンドを持つ活性化された状態となり、表面同士を接触、加圧すると原子レベルで接合される(c, d)。今回作製したのは入射端面へのみ排熱材料としてのダイヤモンド結晶を接合した複合構造である。アルゴン原子ビームの照射条件および加圧の大きさは、試行錯誤により最適化を行った。特に、アルゴン原子ビームの照射時間については、Nd:YAGは5~10分必要であるのに対し、ダイヤモンドは30~70秒の短時間照射にとどめる必要があることがわかり、このとき接合界面に干渉縞等の見られない、全面にわたって良好で強固な接合が得られた(e)。

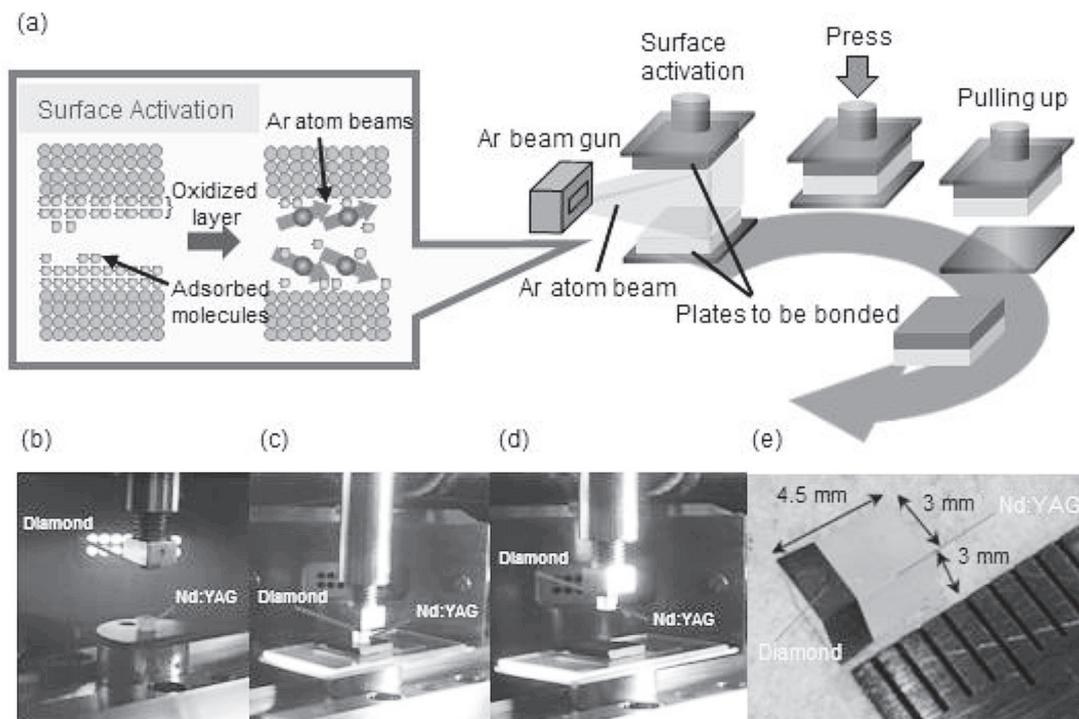


Fig. 1 (a) The room-temperature-bonding (RTB) process. (b) Surface activation by irradiation of Ar atom beams in the RTB process. (c) Two plates are touched and pressed. (d) Bonded plates are pulled up. (e) Fabricated Nd:YAG/diamond composite.

3. 複合構造レーザーの排熱特性評価

まず、作製した複合構造の排熱特性を評価するために、デポラリゼーションの測定を行った。デポラリゼーションとは、レーザー結晶が発熱すると、熱歪で誘起される光弾性効果により複屈折が生じ(熱複屈折)、レーザー光において、もとの直線偏光に対して直交する偏光成分が発生する現象である。測定にはポンププローブ法を用いた⁶⁾。波長 808nm のファイバー結合型半導体レーザーを励起光源とし、ビーム半径 $200\mu\text{m}$ で試料に集光した。一方、プローブ光には波長 635nm の半導体レーザーを用いた。プローブ光は偏光子で直線偏光にして試料を通過させる。偏光子と直交した検光子を用い、熱複屈折効果によって元の直線偏光からデポラライズされたプローブ光成分のみを検出し、デポラリゼーションを求めた。

デポラリゼーションの励起光吸収パワー依存性の測定結果を Fig. 2 に示す。単体の Nd:YAG 結晶に比べ、Nd:YAG/ダイヤモンド複合構造のデポラリゼーションが2分の1程度に小さくなった。このことから、複合構造ではダイヤモンドの高い熱伝導率によって、Nd:YAG 結晶における熱複屈折効果が低減されたことがわかった。

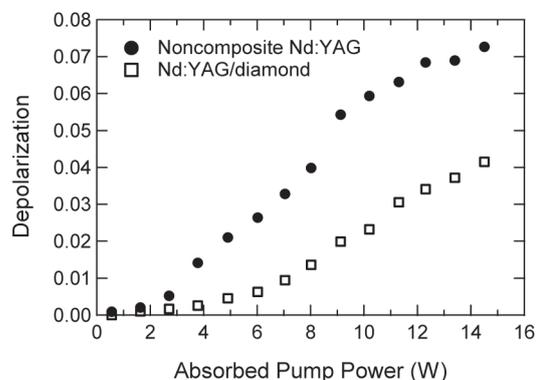


Fig. 2 Dependence of the depolarization on the absorbed pump power for the Nd:YAG/diamond (squares) composite and the non-composite Nd:YAG (circles).

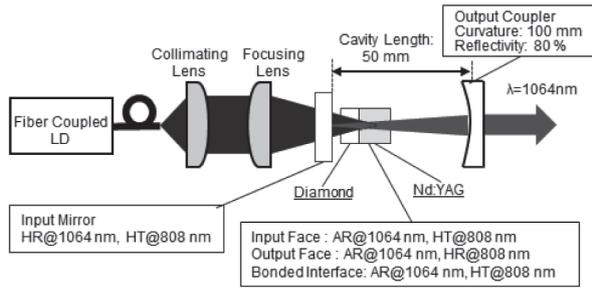


Fig. 3 Experimental setup for the laser oscillation measurement.

4. 複合構造レーザーの発振特性

Fig. 3 に Nd:YAG/ダイヤモンド複合構造を用いたレーザー発振実験の光学系を示す。

励起光源には波長 808 nm のファイバー結合型半導体レーザーを用い、レンズで集光して複合構造に入射した。入射鏡として、波長 1064 nm に対する高反射コーティングを施したフラットミラーを用いた。出力鏡は波長 1064 nm に対して反射率 80 % を持つ、曲率半径 100 mm の凹面ミラーを用いた。また、共振器長は 50 mm とした。ダイヤモンドの入射端面には励起光に対する高透過、レーザー光に対する AR コーティングを、Nd:YAG の出射端にはレーザー光に対する AR コーティングを施した。

レーザー入出力特性の測定結果を Fig. 4 に示す。単体の Nd:YAG 結晶(図中●)では、励起光パワー 15 W 程度まではスロープ効率が 46.3 % であったが、励起光パワーをさらに大きくすると熱効果が顕著となり、最終的に結晶が破損した。一方、Nd:YAG とダイヤモンドとを直接接合した複合構造レーザー(図中□)は、最大の励起光パワー 30 W までほぼスロープ効率が一定のまま出力が増加し、単体から得られた最大出力 7.5 W (励起光パワー 19 W) を上回る出力 9.2 W が得られた。しかしながら、スロープ効率は 35.5 % と単体より小さくなった。これは、ダイヤモンドと Nd:YAG との屈折率が異なり、接合界面でフレネル反射が生じ、レーザー共振器における損失の原因となるためである。波長 1 μm での屈折率は、Nd:YAG が 1.82 であるのに対し、ダイヤモンドは 2.39 と大きい。したがって、接合界面における共振器損失は 3.7 % となる。この値はスロープ効率の実験値から見積もられる共振器損失の増加量とほぼ一致している。

一方、接合界面に 1064 nm に対する AR コーティング層を有する複合構造レーザーの入出力特性を Fig. 4 中の◇示す。AR コーティング層の存在により、接合界面でのフレネル反射が抑えられ、単体とほぼ同程度である 44.9 % のスロープ効率を得られた。そして、出力も単体より 1.5 倍、直接接合複合構造より 1.2 倍大きい、11.4 W が得られた⁷⁾。

さらに、ビーム品質(M^2 値)の評価も行った。単体の Nd:YAG 結晶と Nd:YAG/ダイヤモンド複合構造レーザーに対し、異なる励起パワーにおけるビームプロファイルをそれぞれ Fig. 5 (a)~(c) と (d)~(f) に示す。いずれも励起パワーが大きくなるにともない M^2 値は増大したが、単体結晶では励起パワー 12.7 W で M^2 値が 6.4 になるのに対し (Fig. 5(c))、複合構造レーザーでは励起パワー 14.8 W でも M^2 値が 2.0 と小さく、ビーム品質が良好であることがわかった。これは、複合構造レーザーでは Nd:YAG 結晶で生じた熱がダイヤモンドへ効果的に排熱され、熱レンズ効果が小さくなっていることを示している。

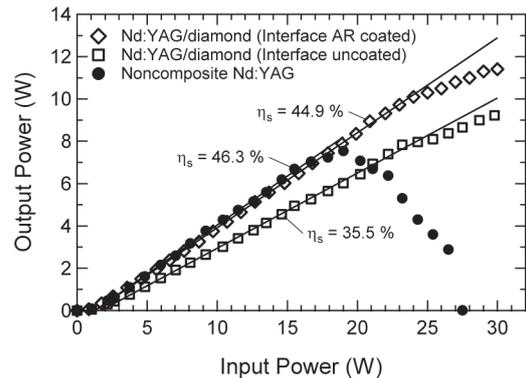


Fig. 4 Laser characteristics of the non-composite Nd:YAG crystal, the directly bonded composite, and the composite with AR coating at the bonded interface.

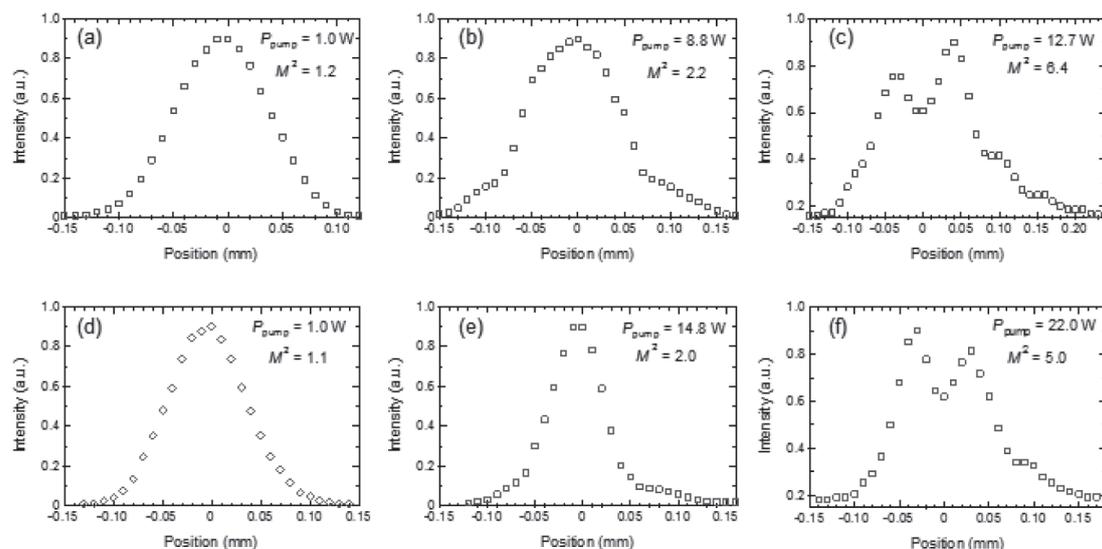


Fig. 5 (a) Beam profiles for the non-composite Nd:YAG laser at the pump power of (a) 1.0, (b) 8.8, and (c) 12.7 W, and for the composite Nd:YAG/diamond laser with its interface AR coated at the pump power of (d) 1.0, (e) 14.8, and (f) 22.0 W, respectively.

5. 結論

本研究では、接合界面に AR コーティング層を有する Nd:YAG/ダイヤモンド複合構造レーザーを、常温接合により初めて作製することに成功した。その結果、界面でのフレネル反射損失が最小限に抑えられ、単体結晶と同程度のスロープ効率を得られること、そして、単体の Nd:YAG 結晶はもちろん、接合界面に AR コーティング層を有しない直接接合複合構造レーザーよりも高出力を達成できることを実証した。コーティング層を介した常温接合が可能になったことから、今後、さらに多様な材料や構造からなる、新しい高性能レーザーデバイスを開発できるものと考えている。

6. 謝辞

本研究は、平成 28 年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝いたします。

7. 参考文献

- 1) F. Hanson, Appl. Phys. Lett. **66**, 3549 (1995).
- 2) M. Tsunekane and T. Taira, Opt. Lett. **31**, 2003 (2006).
- 3) P. Millar, A. J. Kemp, and D. Burns, Opt. Lett. **34**, 782 (2009).
- 4) T. Suga, Y. Takagi, B. Gibbesch, and G. Elssner, Acta Metall. Master. **40**, S133 (1992).
- 5) I. Shoji, T. Ishikawa, T. Yamauchi, K. Hara, and S. Matsumoto, Tech. Dig. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe 2013, CE-6.4 (2013).
- 6) I. Shoji, Y. Sato, S. Kurimura, V. Lupei, T. Taira, A. Ikesue, and K. Yoshida, Opt. Lett. **27**, 234 (2002).
- 7) H. Ichikawa, K. Yamaguchi, T. Katsumata, and I. Shoji, Opt. Express **25**, 22797 (2017).